

# SPS の形状制御を目的とした カーボンナノチューブアクチュエータの研究 Basic Study on Carbon Nanotube Actuator aimed at Flatness Controlling of Large Antenna Panel of SPS.

久米孝志<sup>\*1‡</sup>・田中孝治<sup>\*2</sup>・山極芳樹<sup>\*1</sup>・藤本健晋<sup>\*1</sup>  
Takashi KUME, Koji TANAKA, Yoshiki YAMAGIWA and Kensin FUJIMOTO

SSPS は多数の発電電一体型パネルによって構成される大規模発電衛星である。発電側に太陽電池、送電側にアンテナを搭載した発電電一体パネルが用いられ、マイクロ波で地上へエネルギーを送る。静止衛星軌道上に建設される SPS は、送電側は常に地球方向を向き、太陽との位置関係が周期的に変化する。そのため、発電電パネルは周期的な熱変形が生じる。その変形を補正するため、カーボンナノチューブアクチュエータによる制御を提唱し、検討を行っている。本論文では、CNA の発生力と変形形状予測について論じる。

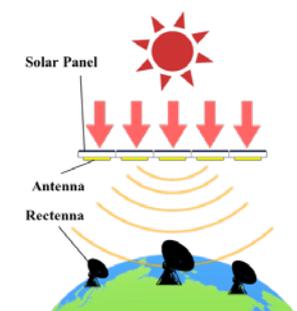
SSPS is a large-scale power generation satellite that is constructed from power generation and transmission panels. Solar arrays will be mounted on the power generation side and generate electricity by the sunlight. Microwave antennas will be mounted on the transmission side and transmit energy to the earth by the microwaves. Power transmission side will always face to the earth. Cyclic thermal deformation will occur in the power generation and transmission panel because the irradiation conditions of the panel by the sunlight are cyclically changed. Thermal deformation in the panel will decrease the power transmission efficiency. So we have been developing the flatness controlling of the large-scale antenna panel of SPS using carbon nanotube actuators. We describe the experimental results of generating power by CNA and prediction of figure of CNA.

**Keywords :** Carbon nanotube actuator, control of flatness

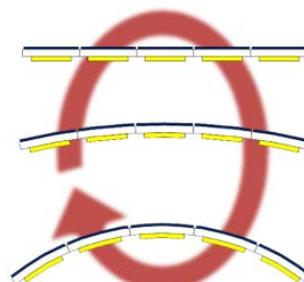
## 1. 研究背景

宇宙太陽発電衛星(Space Power Satellites : 以下 SPS)は、宇宙空間で太陽発電を行い、マイクロ波による無線送電を地上に向けて行う発電衛星である<sup>1)</sup>。第 1.1 図に概略図を示す。

SPS は多数の発電電一体型パネルによって構成される。発電電一体型パネルとは、表裏に発電用の太陽電池を搭載し、地球を向く側には無線送電用のアンテナが搭載されるパネルである。SPS は静止衛星軌道上に建設され、送電側は常に地球方向を向いていることと、太陽との位置関係の変化により、周期的に発電電パネルの温度分布が変化する。さらに、発電側(受光側)と送電側の温度差から、第 1. 2 図のような熱変形が生じる。



第 1.1 図 太陽発電衛星概略図



第 1.2 図 周期的な熱変形

† 第 1 回宇宙太陽発電シンポジウム, 2015 年 12 月 15-16 日, 東京にて発表

‡ Corresponding author: Takashi KUME. E-mail:t-kume@ac.jaxa.jp

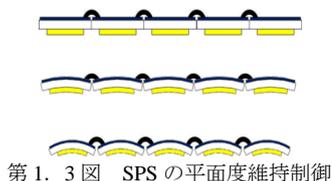
\*1 静岡大学

〒432-8011 静岡県浜松市中区城北 3 丁目 5-1, Shizuoka University  
3-5-1, Johoku, Naka-ku Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8011, Japan

\*2 ISAS/JAXA 相模原キャンパス

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1,  
Yoshinodai, Chuo-ku Sagami-hara-shi, Kanagawa, 252-5210, Japan.

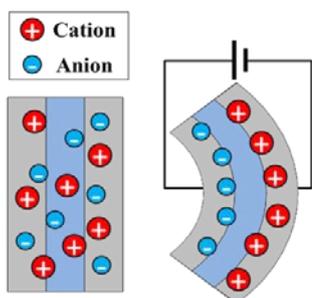
この熱変形が生じると、マイクロ波による送電効率や精度への影響が懸念される。そこで、パネル間にアクチュエータを分散配置し、第 1. 3 図のようにパネル同士の角度を変化させることによって、熱変形の生じた状態でも見かけ上の平面度を維持する制御を行う。



第 1. 3 図 SPS の平面度維持制御

我々は、この SPS 制御用アクチュエータとして、Carbon nanotube actuator (以下 CNA)を提唱し、試作評価試験、システム評価を行った。

CNA は高分子アクチュエータの一つで、電極層部分にカーボンナノチューブ(以下 CNT)を分散させたものである<sup>2)</sup>。第 1.4 図に CNA の概略図を示す。



第 1.4 図 CNA 概略図

CNA の構造は、セパレータを CNT 電極によって挟み込む三層構造となっており、CNA 全体にイオン液体が含有されている。

イオン液体とは常温で液体の塩であり、CNA の電極間で電位差をかけることによって、内部のカチオンとアニオンが第 1. 4 図のように移動し、電気二重層と呼ばれるイオンの層を形成する。

この電気二重層の形成により、カソード側、アノード側電極それぞれに含有されるイオンの体積差が生じ、パイロルフ効果によって CNA の形状が変化する。

CNA の特徴として

- 薄膜形状：100～150[ $\mu\text{m}$ ]
- 低密度： $\sim 0.2[\text{g}/\text{cm}^3]$  (参考:SUS304 7.93[ $\text{g}/\text{cm}^3$ ])
- 理論的に長寿命
- 真空環境下でも使用可能
- エネルギー回生が可能

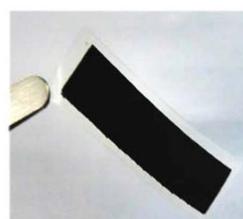
といった点が挙げられる。CNA の変形のメカニズムは、化学的な変化ではなく、イオンの移動による体積効果であるため、繰り返し使用できるといった特徴がある。また、変形が電荷の充電によって生じ、変形解除時に放電が起こるため、電気二重層コンデンサと同様エネルギーの貯蓄が可能なることから、エネルギーの回生が可能である。

以上の点より、SPS のような宇宙大型構造物の形状制御において、CNA の使用を検討した。

本論文では、SPS の平面度維持を目的として、CNA の性能評価、検討を行った。はじめに、CNA の発生トルクを計測し、パネル間の角度制御において要求される CNA を検討した。また、制御において必要となる CNA の変形形状予測を行った。変形予測においては、多層膜はりの熱変形モデルを適用し、計測結果と予測値からその妥当性を検討した。

## 2. CNA による発生力

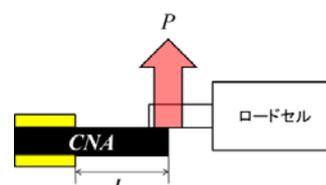
2.1 CNA 発生力計測 試作した CNA(第 2.1 図)を用いて、発生トルクの計測を行った。計測方法としては第 2. 2 図のように片持りモデルを模擬して電極でクランプした CNA の先端を、ロードセルに接触させ、電圧を印加し、その先端発生力を計測する。



第 2.1 図 試作 CNA

第 2.1 表 CNA 諸元

長さ [mm]	30
幅 [mm]	10
厚み [mm]	0. 162
重量 [mg]	82. 35



第 2.2 図 CNA 発生力計測概略図

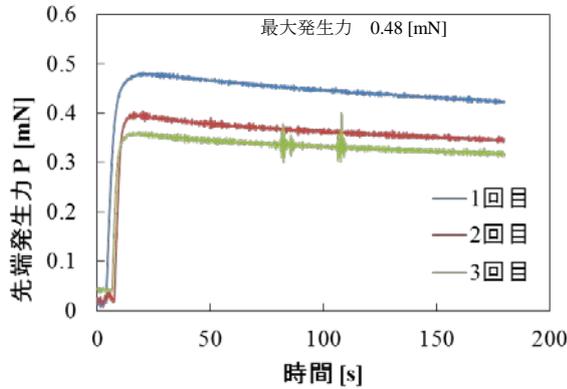
第 2.3 図のように CNA とロードセルを固定し、真空チャンバ内で CNA へ電圧印加を行った。



第 2.3 図 CNA 発生力計測実験治具

本実験はすべて真空環境下(0.2[Pa])で行った。これは宇宙環境を模擬するとともに、CNA が大気中の水分を吸湿し、イオン液体のアニオン、カチオンの移動が阻害され、再現性を失うことを防ぐためである。<sup>3)</sup>

**2.2 実験結果** CNA 発生力計測結果を第 2.4 図に示す。印加電圧は使用しているイオン液体 EMIBF4 の電位窓範囲内で最大値の 3.0 [V]とし、また突出長さは 20 [mm]で行った。



第 2.4 図 CNA 先端発生力

ここで得られた最大発生力  $P_{max}$  と突出長さ  $L$  から最大発生トルク  $T_{max}$  は以下の式(2.1)により算出する。

$$T_{max} = P_{max} \cdot L \quad (2.1)$$

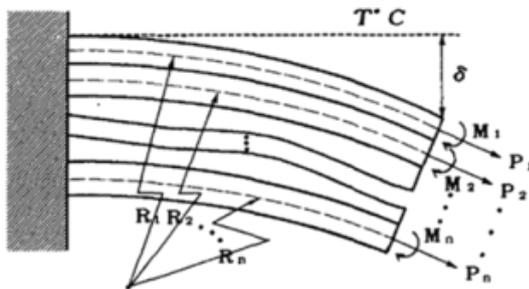
以上から、CNA の発生力、発生トルクに関しては第 2.2 表となる。

第 2.2 表 CNA 発生力・発生トルク

最大発生力	[mN]	0.4828
最大発生トルク	[mN・m]	0.0097
面積あたりの発生力	[N/m <sup>2</sup> ]	2.4142

### 3. CNA の変形形状予測

**3.1 形状予測モデル** 多層薄膜材料の熱変形モデル(第 3.1 図)を CNA の変形に当てはめ、その妥当性と精度を検証する。<sup>4)</sup>



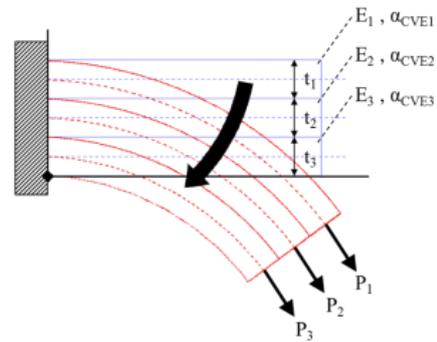
第 3.1 図 多層膜熱変形モデル

多層膜熱変形モデルでは、各層の熱膨張係数の違いと温度変化によって発生する、バイモルフ効果を予測する。

本研究における CNA は三層薄膜構造であり、電圧の印加によって、膨張と収縮が発生し、同様にバイモルフ効果によって変形が生じる(第 3.2 図)。

多層膜熱変形モデルを三層構造 CNA の変形形状予測に用いるにあたり、熱膨張係数を式(3.1)で示す電圧膨張係数

$\alpha_{cvs}$  と置き換え、CNA への印加電圧を関数として形状の予測を行う。

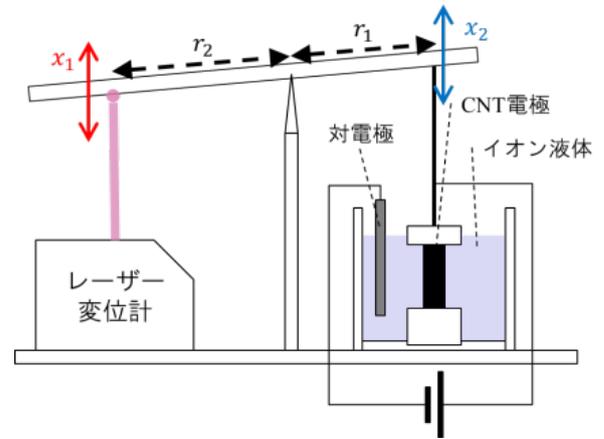


第 3.2 図 三層構造 CNA 変形モデル

$$\alpha_{cvs} = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot V} \quad (3.1)$$

$\Delta l$  は伸縮量、 $l_0$  を初期長さ、 $V$  を印加電圧とする。次に、電圧膨張係数の計測について述べる。

**3.2 電圧膨張係数計測** 電圧膨張係数の計測について示す。三層構造 CNA は、隣り合った層同士により変形が抑制されるため、自由変形した場合の値は、変形形状からの予測値でしか得られない。そのため、CNT 電極層のみで膨張収縮を発生させ、変位量を計測する実験を行った。実験構成に関しては第 3.3 図に示す。

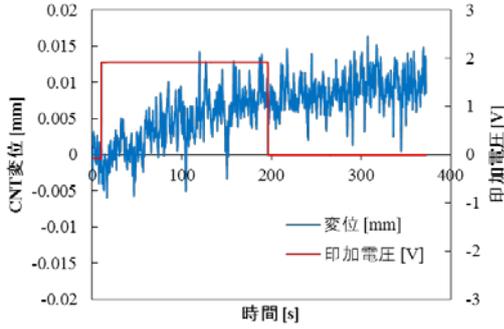


第 3.3 図 電圧膨張係数計測実験構成

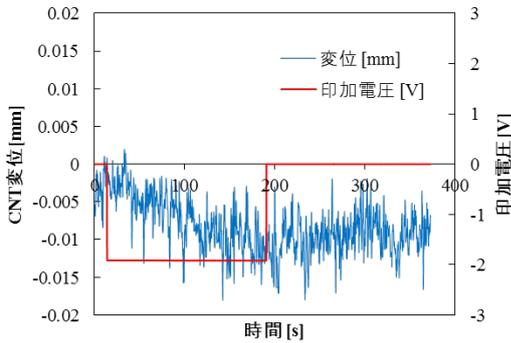
イオンの移動を可能にしつつ、膨張を自由に発生させるため、CNT 電極をイオン液体に浸し、対電極と CNT 電極間に電位差を発生させた。また、伸縮量は微小なものと予測されるので、イオン液体を浸した CNT 電極を検出量増大のための治具に取り付け、レーザー変位計での検出変位量を  $r_2/r_1$  倍させた。

今回の実験では使用イオン液体を CNT 電極に使用したものと同じ EMIBF4 で、 $r_1=425$  [mm]、 $r_2=68$  [mm]、験片形状  $30 \times 10$  [mm<sup>2</sup>]で行った。また、電位窓内に収まり、かつ膨張収縮を可能な限り大きく出来る 2.0 [V]で計測を行った。

**3.3 電圧膨張係数計測結果** 電圧膨張係数計測結果を第 3.4 図、第 3.図に示す。

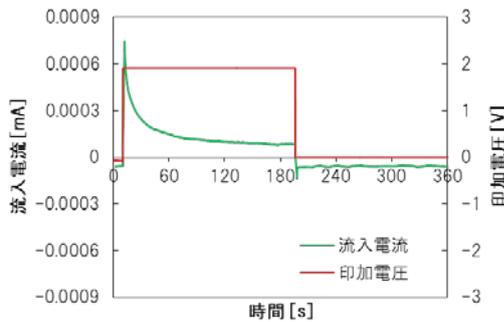


第 3.4 図 カチオン充電時変位

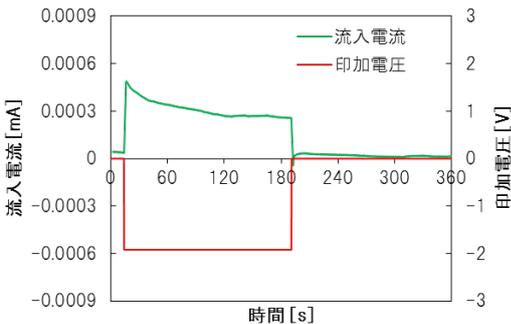


第 3.5 図 アニオン充電時変位

第 3.4 図は CNT 電極にカチオンを充填, 第 3.5 図はアニオンを充填した結果である. 電圧印加によって前者は膨張, 後者は収縮している様子が確認できた. また, それぞれの流入電流量を微小電流計で計測したところ, 第 3.6 図, 第 3.7 図のようになった.



第 3.6 図 カチオン充填時流入電流



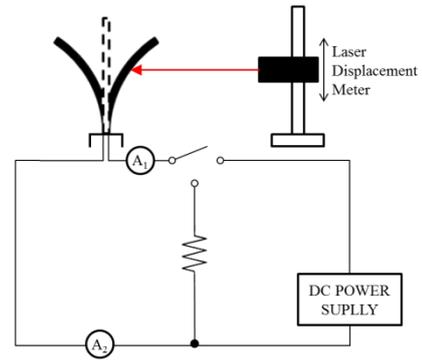
第 3.7 図 アニオン充填時流入電流

カチオン, アニオン充填時そのどちらでも電荷の充填を確認できる. 以上の結果から, 電圧膨張係数と静電容量を算出した結果, 第 3.1 表のような結果になった.

第 3.1 表 電圧膨張係数と静電容量

	電圧膨張係数	静電容量 [F]
カチオン充填時	1.92.E-04	6.80E-06
アニオン充填時	-1.95.E-04	7.68E-06

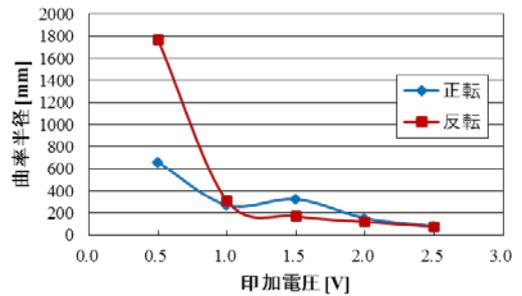
**3.4 CNA 変形状計測** 電圧膨張係数と多層膜モデル式によって予測した形状と比較のため, 電圧膨張係数計測試験で使用した CNT 電極と同様のものを用いて試作した CNA の変形状を計測する. 形状計測の実験構成を第 3.8 図に示す.



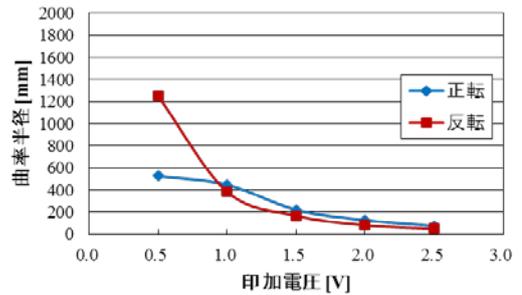
第 3.8 図 CNA 変形状計測

計測方法としては, 垂直に立てた CNA に電圧を印加し, CNA に対してレーザー変位計を走査することによって二次元形状化する. 本実験も CNA の変形は真空中で行い, 充放電時の電流を計測する.

**3.5 CNA 変形状計測結果** 二種類の CNA に対して計測を行った. 計測した形状を曲率半径で示したものを第 3.9 図, 第 3.10 図に示す.

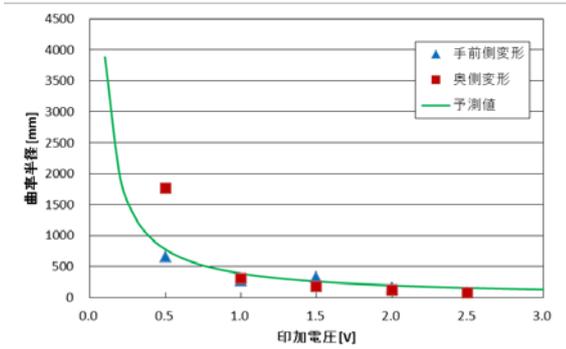


第 3.9 図 SSCNA001 変形状

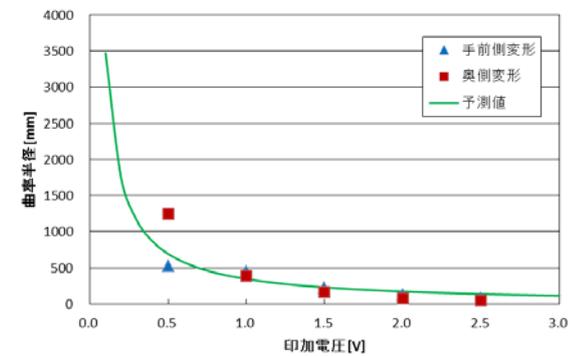


第 3.10 図 SSCNA002 変形状

印加電圧の上昇とともに曲率半径が小さくなっていることが見て取れる。



第 3.11 図 SSCNA001 変形予測



第 3.12 図 SSCNA002 変形予測

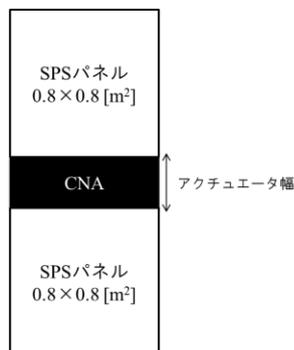
手前側一奥側変形それぞれの値は、形状計測実験の際に、印加電圧を逆転させ、レーザー変位計に対して手前側一奥側に変形させた時の値である。

実測値と予測値を並べると、ほぼ実際の変形形状の電圧に対する挙動を予測できていると思われる。

## 4. 考 察

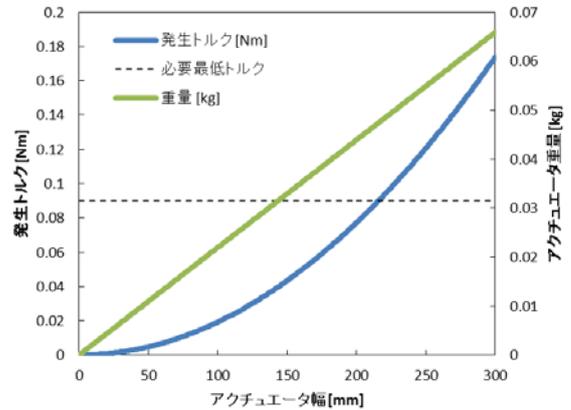
**4.1 発電電一体型パネル制御に要求される CNA** 現状得られた CNA が発生可能なトルクから、実際の発電電一体型パネルの形状制御を行う場合を検討した。

まず、第 4.1 図のような  $0.8 \times 0.8$  [m<sup>2</sup>] のパネル間の角度制御において考える。ヒンジ間の摩擦は 0.09 [Nm] とする。この値は、ASTRO-F 太陽電池パドルを参考にした。



第 4.1 図 最小単位での角度制御

第 4.1 図のような最小単位でのパネル角度制御において、パネル間全てに CNA を敷き詰め、最低要求トルクとアクチュエータ幅、重量の関係は第 4.2 図のようになった。



第 4.2 図 要求トルクと重量

第 4.2 図より、最低でも 216[mm]幅の CNA の搭載が必要であることが分かる。重量にして、0.047[kg]である。

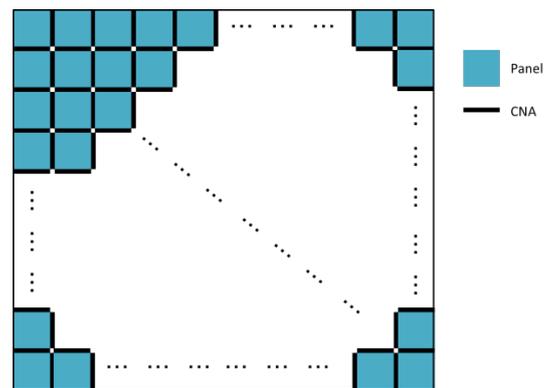
また、この結果から実際の SPS のスケールでの CNA 総重量を考える。考察する SPS のモデルにおいては、第 4.1 表に示す USEF2006 年度モデルを用いた。

第 4.1 表 USEF2006 年度モデル SPS 諸元<sup>5)</sup>

軌道	36,000 [km]
重量	約 31,000 [ton]
太陽電池面積	$2.4 \times 2.6$ [km <sup>2</sup> ]
発電能力	2 [GW] (正味 1 [GW])
送電アンテナ直径	太陽電池面積に同じ
出力 DC 電力	マイクロ波 5.8 [GHz]

USEF2006 年度モデル

この SPS で設定された太陽電池面積を得るには、 $0.8 \times 0.8$  [m<sup>2</sup>] パネルを 3000 × 3250 枚要するとなると、パネル間に搭載するべきアクチュエータは 9749450 個必要になる(第 4.3 図)。



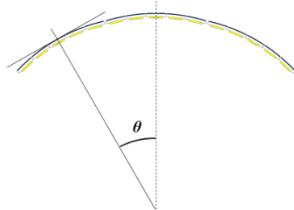
第 4.3 図 SPS への CNA 分散配置

この場合、CNA の総重量は 462.5 [ton] である。

一方、0.03 [Nm] の出力が可能なモータの重量は 160 [g] であり、CNA と同等の出力を得るためには、4679 [ton] 程度の重量となる。これは、CNA の場合の約 10 倍であり、輸送のための重量軽減において CNA がモータよりも優れ

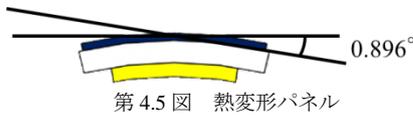
ていると結論付けられる。

マイクロ波による送電において、電力損失を 1%以下に抑えるために必要な条件は、第 4.4 図に示すパネルの平坦度  $\theta$  が  $\pm 5^\circ$  以下である必要がある。



第 4.4 図 パネル平坦度

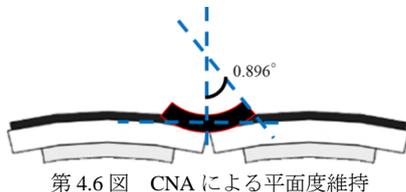
単純に、送電一体型パネルを密なアルミの一枚板とし、送電面それぞれの表面温度を  $100^\circ\text{C}$  と  $50^\circ\text{C}$  と仮定する。その場合、 $0.8 \times 0.8 \times 0.05 \text{ [m}^3\text{]}$  パネルに発生する変形は、第 4.5 図で示すような  $0.896^\circ$  の反りとなる。



第 4.5 図 熱変形パネル

実際の送電パネルにおいては、CFRP やテフロン等の複合材料であり、また熱膨張係数も小さいため、アルミの一枚板で仮定した値よりも変形は小さいため、この仮定における変形に対し、CNA が平面度を維持できれば、実際の制御において十分な性能があると言える。

第 4.1 図で示すように、216 [mm] 幅の CNA を第 4.6 図のように搭載したとする。



第 4.6 図 CNA による平面度維持

幅 216 [mm] の CNA を用いて  $0.896^\circ$  のパネル間角度の制

御を行うには、CNA の変形曲率半径が 6.91[m] である必要がある。

3.6 節における CNA 変形状計測実験において、最小印加電圧  $0.5 \text{ [V]}$  でも曲率半径は  $0.53 \text{ [m]}$  であり、要求される曲率半径よりもより小さい半径で変形が可能となっている。

つまり、実際の熱変形よりも大きな変形が予測されるアルミ板での形状制御においても、十分な変形が CNA で可能であると言え、SPS におけるパネル制御は CNA で十分可能であると考えられる。

## 5. 結 論

本論文では CNA の試作評価を行い、設計手法の検討と、CNA の発生力や変形に着目した SPS におけるのシステム検討を行った。

多層膜はりモデルを適用した設計手法の検討では、電圧膨張係数の計測により、CNA の挙動予測がある程度可能であったことを示した。

また、我々が試作した CNA による SPS の平面度維持は現状のスペックにおいても可能であり、またモータを用いた構成よりも、大幅に制御機構の重量を軽減できることが分かった。

今後の展望としては、更なる変形状予測の精度の向上や、CNA の原理解明を通じた、性能向上を目指した研究を行っていく。

## 参 考 文 献

- 1) 中野不二男: クリーンなエネルギーをつくる太陽光発電衛星, 宇宙航空研究開発機構(JAXA) (2009).
- 2) 樋口俊郎, 大岡昌博: アクチュエータ研究開発の最前線(2011), pp. 71-79.
- 3) 吉田隆: イオン性液体の機能創成と応用 (2004), pp. 70-72.
- 4) Oda, J., Abe, S. : Analysis of Stress and Deflection of Printed Plate Board Using Multilayered Beam Theory, *Transactions of the JSME Series A* **59** (1993), pp. 1777-1782.
- 5) 無人宇宙実験システム研究開発機構: 平成 18 年度太陽光発電利用促進技術調査成果報告書 (2006).

(2016.2.2 受付)